

金星気球のモデル試験

西村 純*・矢島 信之*・藤井 正美*・横田 力男*

A Model Experiment of the Venus Balloon

By

Jun Nishimura, Nobuyuki Yajima, Masami Fujii
and Rikio Yokota

Abstract: In order to explore the dynamics and composition of the Venus atmosphere, characteristics of several types of Venus balloons have been investigated. Vapor of a suitable liquid in the balloon gives buoyancy in the carbon dioxide atmosphere of Venus. In this case the phase transition of vapor to liquid occurs as the atmospheric temperature changes with the altitude on the Venus. Thus, the phase transition of vapor to liquid in the balloon works to stabilize the balloon altitude. A model experiment testing the phase transition balloon in a water vessel with an appropriate temperature gradient and some results obtained with this model experiment are described.

概 要

この論文では金星大気の運動や組成を観測する金星気球を開発するため、金星気球のモデル試験の方法を提案する。金星浮遊気球としては、いくつかの形態が提唱されてきたが、ここでは適当な液体をつめた相転移気球について詳しく検討する。金星大気の主成分は炭酸ガスで、高度が下がるとともに温度が上昇するので、気球内に入れた液体が蒸発して浮力を生ずる。ある高度を境として蒸発と液化が起こるので、気球は一定高度に安定に浮遊することができる。金星大気から金星気球への熱

* 宇宙科学研究所

伝達について詳しく解析するとともに、温度勾配をつけた小型の水槽にモデル気球を浮かべて、相転移気球の試験を行えることを実証した。

1. はじめに

1985年6月にベガ搭載の金星浮遊気球が成功した[1]。このミッションでは直径3.5m、全重量21kgの2機のスーパープレッシャー気球が、金星大気に投入された。これら2機の気球の動きは地球上の20箇所の電波望遠鏡を使ったVLBI方式で追尾され、金星大気の運動が解析された。現在、さらにいくつかの惑星の大気中に気球を浮遊させて惑星大気の状態を詳しく観測する惑星気球の計画が議論されている。宇宙研においても近い将来、金星ミッションを実行することが検討されており、昭和62年度の科学衛星シンポジウムでは西村[2]らによって金星浮遊気球が提案された。また昭和63年度の大気球シンポジウムでは山中[3]らによって金星大気観測の物理的意義と重要性が指摘された。とくに金星大気の組成・構造・運動、上部対流圏の4日循環の生成・維持機構の解明が待たれている。

西村らの提案によると気球が浮遊する高度によって三つのオプションがある。まず高度60~50kmでは温度や気圧も地球大気に近いので、気球も通常の方法で考えやすい。比較的高温に耐える気球材料としてはテフロンやカプトンなどが考えられる。高度50~20kmでは温度が約70°Cから300°Cの範囲にあるので、金属の薄板でできた気球になる。これに液体の蒸気を入れると高度が上がると液化し高度が下がると気化する。つまり安定点が存在する。水の場合、安定点は高度42kmで温度は130°C、気圧は2.7気圧である。この考えは最初Blamontによって提唱されたものでPhase Transition Balloon(相転移気球)と呼んでいる[4]。高度が20km以下になると温度は300°C以上となり密度も20kg/m³以上となるので小型の金属ベロー型の気球が考えられる。

ここでは相転移気球を実現するため、金星気球のモデル試験を行う方法を提案し、その試験結果について報告する。モデル試験によって金星気球の設計に必要な基礎的な資料が得られるものと考えている。

2. 相転移を利用した金星気球の構成

金星気球を考えるための基礎データとして、金星大気モデルを表1に示した。高度50km

表1 金星大気モデル

高度 H (km)	気圧 P (atm)	温度 T (K)	密度 ρ (kg/m ³)	$P/T \cdot dT/dP$
0	90.0	735	64.3	0.17
10	46.2	658	37.7	0.184
20	21.9	576	20.1	0.184
30	9.2	492	9.9	0.188
40	3.3	413	4.3	0.157
50	1.0	347	1.5	0.232

(注) 地球大気 $P/T \cdot dT/dP \sim 0.20(6^\circ\text{C}/\text{km})$

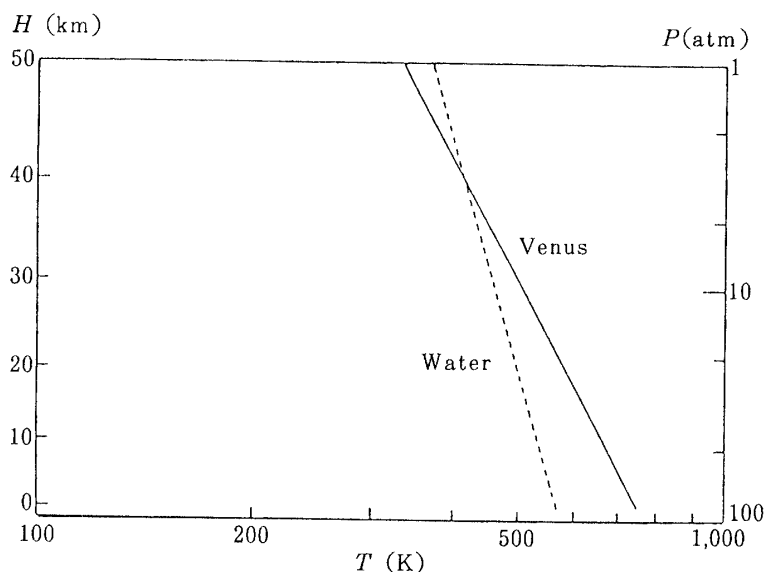


図1 金星と水の P-T ダイアグラム

付近の観測はすでに VEGA によってなされているので、金星大気の運動を調べる上でさらに興味のある高度20km 付近に浮遊する気球を考える。金星大気は高度20km 付近で $P=21.9$ 気圧、 $T=576\text{K}\sim 330^\circ\text{C}$ 、密度 $=20\text{kg}/\text{m}^3$ 、大気の組成は96.4%が CO_2 である。図1に金星大気と水の $P-T$ ダイアグラムを示したが、これからも定性的に浮遊安定点があることが分かり、水の場合には高度42km となる。しかし高度40km 以下では CO_2 より分子量が小さく、飽和曲線が金星大気の高高度-温度曲線と交わるような適当な液体が見あたらない。このためここでは He ガスあるいは水蒸気をつめた主気球とパラキシレンをつめた補助気球を組み合わせたタンデム型気球を考えることにする。パラキシレンの飽和曲線は金星大気の高高度-温度曲線と高度17km で交差する。従って補助気球につめたパラキシレンの相転移がタンデム型金星気球の浮遊高度を安定させる働きを受け持つことになる。

高度17km での金星大気の高高度、温度、密度はそれぞれ28気圧、 330°C 、 $25\text{kg}/\text{m}^3$ である。パラキシレンの分子量は106であるので、補助気球中の1kg のパラキシレンが蒸気になることにより0.42kg の浮力を与える。例えば補助気球に5kg のパラキシレンをつめることにすると、相転移による浮力の変化は2.1kg で、これがタンデム型金星気球の浮遊高度を安定させる。高度17km で5kg のパラキシレンがすべて蒸発したときの補助気球の容積は 0.08m^3 となる。補助気球の諸元は表2にまとめた。

表2 補助気球の諸元

容積	$V=0.08\text{m}^3$
半径	$R=0.27\text{m}$
表面積	$S=0.90\text{m}^2$
液量	$=5\text{kg}$
速度	$v=1\sim 5\text{m}/\text{sec}$ とする
Re	$= (0.8\sim 4.0)\times 10^6$

3. 相転移気球の気化・液化に関する熱伝達の検討

相転移気球が最終的に浮遊高度で安定するまでの運動は、液体の気化と液化の時間スケールによって左右される。従って金星大気と気球の熱交換を詳しく調べておくことが重要である。ここではパラキシレンをつめた補助気球への熱の流入を考える。周囲の大気から気球への熱伝達は Nusselt 数 Nu を使って次のように計算できる。

$$\begin{aligned}\Delta Q &= K/D \cdot Nu \cdot \Delta T \\ &= K/D \cdot 0.03 Re^{0.8} \Delta T \\ &= (18 \sim 67) \Delta T \text{ cal/m}^2 \text{ sec}\end{aligned}$$

ここで K , D , ΔT , Re はそれぞれ熱伝達係数, 気球の直径, 温度差, Reynolds 数である。大気と気球との温度差 ΔT を約 15°C とすると, 補助気球への熱流入量は $Q=0.24 \sim 0.90$ kcal/sec となる。ここでパラキシレンの蒸発熱を考慮すると, 補助気球中のパラキシレンがすべて蒸発するのに $500 \sim 2,100$ sec かかる。従ってこの間に気球は $2 \sim 3$ km 動く。

液化の場合も同じような事情になるので, 気球は 2 km 程度のハンティングをすることが予測される。ただしいったん水平浮遊に入れば液体のごく一部の気化, 液化で気球高度はバランスするので安定な水平浮遊を続けるものと考えられる。 20 km 程度の高度で 2 km 変わると気圧にして $\pm 2.5 \sim 3.5$ 気圧 (約 $\pm 10\%$) 温度にして $\pm 15 \sim 17^\circ\text{C}$ 変わるので, 気球が破壊しないよう水平浮遊高度でもある程度容積が変動しうるか排気弁を付けるなどの方策が必要である。

4. 水槽中でのモデル気球とスケーリング

モデル試験を行う場合は 100°C 以下の方が取扱い易いので, メチルアルコール (沸点 64.9°C) またジエチルエーテル (沸点 34.6°C) をつめたモデル気球を水槽に浮かべる方式を考える。具体的な計算は表 3 に示したジエチルエーテルの場合について行った。モデル気球の容積は 10 cc, 速度は約 5 cm/sec とした。先に考察した金星気球とモデル気球のパラメータを比較すると表 4 のようになる。

水槽に浮かべたモデル気球への熱の流入は先に考察した金星気球の場合と同様に計算でき

$$\begin{aligned}\Delta Q &= 7 \cdot 10^{-3} \cdot S \Delta T \text{ cal/sec} \\ &= 0.15 \Delta T \text{ cal/sec}\end{aligned}$$

を得る。

ジエチルエーテルの液量はモデル気球の容積 $v=10$ cc に対して 0.01 cc 必要で全体の気化

表 3 ジエチルエーテルの物性

比 重	$C_p = 1.79 \text{ J/gK} = 0.428 \text{ cal/gK}$ $C_p/C_v = 1.0$
沸 点	34.6°C
比 熱	2.34
熱 伝 導 率	0.138 W/mK 液体 $2.2 \cdot 10^{-2} \text{ W/mK}$ 気体
蒸発の潜熱	84 cal/gr

表4 金星補助気球とモデル気球の比較

	大気密度 (g/cc)	粘性係数 (Pa·s)	長さ R (cm)	速度 v (m/sec)	熱伝導率 K (W/mK)
補助気球	0.02	$2 \cdot 10^{-5}$	27	1~5	0.022
モデル気球	1.0	$1 \cdot 10^{-3}$	1.3	0.05	0.60

	レイノルズ数 Re	熱伝達 $= K/D \cdot Nu$ $10^{-4} \text{cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$
補助気球	$(0.8 \sim 4.0) \cdot 10^6$	18~67
モデル気球	$1.5 \cdot 10^3$	70

表5 高さと時間のスケーリング

	金星	水槽	スケール
液体気化のタイムスケール	~1000秒	2~3秒	300~500
ハンティングの高さ	~2km	~10cm	~ $2 \cdot 10^4$
速度 v	1~5m/秒	5cm/秒	20~100
温度差	~15°C	5~10°C	

熱は $84 \text{cal} \times 0.01 = 0.84 \text{cal}$ である。従って温度差 ΔT が 2~3 度のとき全部蒸発するのに 2~3 秒かかる。この間気球は 10cm 程度移動する。このため水槽の温度勾配は $2 \sim 3^\circ\text{C}/10 \text{cm}$ 以上必要である。

金星気球とモデル気球のハンティングの高さと時間のスケールの違いは表5にまとめた。時間と長さをこの表のスケールで測ると、速度も自動的にスケールすることになる。

5. 水槽温度のスタビリティとモデル実験の結果

モデル気球の試験を行うには、水槽の下部の方を高温に上部の方を低温にし、金星大気と似た温度勾配を作る必要がある。水槽の底部にヒーターを取り付けただけでは対流がおきて、このような温度勾配をつくることはできない。このため下部ほど水の密度を高くしておく必要がある。水の体積膨脹係数は 0.21×10^{-3} であるが、安全をみて 10^{-3} にとると $\Delta T \sim 30^\circ\text{C}$ で 3×10^{-2} となる。従って水槽の底部での密度が表面に比べて 0.03 以上大きければよい。このため例えば CaCl_2 などを溶かした異なる濃度の溶液を分布させればよい。 CaCl_2 の濃度と水溶液の密度の関係を表6に示した。この表から水槽の底部に CaCl_2 を入れ、表面と底部の密度差を 4% 以上にすれば温度差が 30°C ある状態でも対流がおきず安定であることが分かる。また CaCl_2 の拡散速度は小さく、実際に 1 週間以上にわたって安定に温度勾配を維持できることが確かめられた。

表6 CaCl_2 の濃度と水溶液の密度

濃度	4%	10%	20%	30%
密度	1.0316	1.0835	1.1775	1.2816

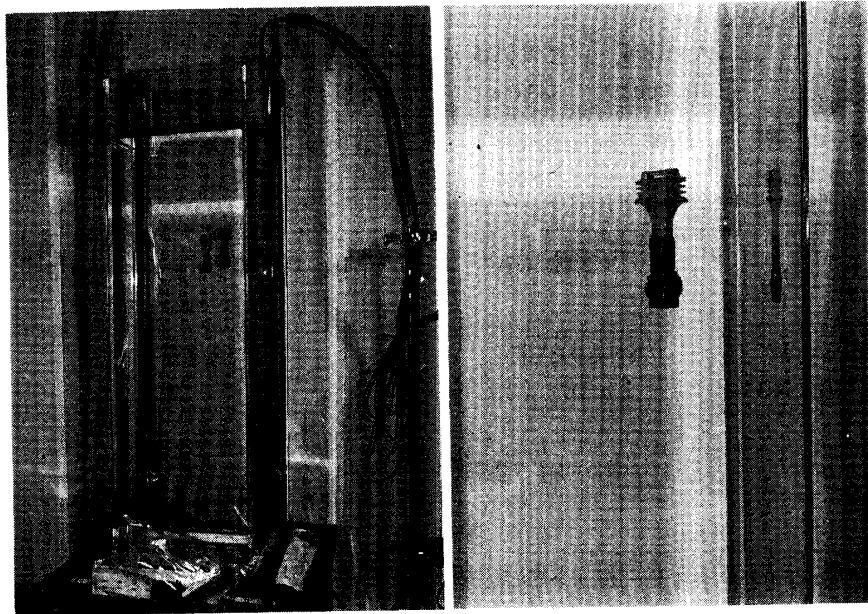


図2 水槽中に浮遊しているモデル気球

ここで水槽中のモデル気球を $5\text{cm}/\text{sec}$ 程度で上昇させるのに必要な浮力を求めてみることにする。

$$\text{浮力} = \frac{1}{2} \cdot C_D \rho S v^2$$

であるから, $C_D \sim 1$ ($\text{Re} \sim 10^3$)

$$\text{密度 } \rho = 1\text{g}/\text{cc}$$

$$\text{面積 } S = 5\text{cm}^2$$

$$\text{速度 } v = 5\text{cm}/\text{sec}$$

を代入すると浮力 $= 64\text{dyne} = 0.065\text{g}$

となる。

実際にこのようなモデル気球で実験したところ、熱伝達の解析から予測したとおり 10cm 程度のハンティングが観測された。しかしいったん浮遊高度に入ると、モデル気球は大変安定に一定の高度（一定の深さ）に静止した。この様子を図2に示した。

6. ま と め

惑星気球のモデル試験、とくに金星大気中に安定して浮遊する Phase Transition 気球のモデル試験の概念と方法について述べた。相転移気球が最終的に浮遊高度で安定するまでの運動を解析するため、気球に対する熱伝達について金星気球の場合とモデル気球の場合の比較を行った。また実際、金星大気温度分布をシミュレートした小型の水槽を使ってモデル試験を行った。水槽の底に濃度の高い CaCl_2 溶液を入れておくと、 CaCl_2 の拡散速度は大変遅く、長時間にわたって適当な温度勾配を維持できることが分かった。またここに示した熱伝達の計算がおおむね正しく、ハンティング高度は計算どおり $\pm 10\text{cm}$ 程度であることが確

かめられた。今後、金属ベローズを使ったモデル気球の試作や、浮遊安定点の高度を変えるため二種類の液体を混合して使う場合などについて検討して行く予定である。モデル実験で得られた結果は金星気球の設計に反映させたいと考えている。

文 献

- [1] R.Z. Sagdeev, V.M. Linkin, J.E. Blamont and R.A. Preston, The VEGA Venus balloon experiment, *Science*, **231** (1986) 1407.
- [2] 西村 純他, 金星浮遊気球. 科学衛星シンポジウム報告, 昭和62年度, 97.
- [3] 山中大学他, 金星下層大気浮遊気球. 大気球シンポジウム報告, 昭和63年度, 44.
- [4] J. Blamont, Balloons on other planets, *Adv. Space Res.* **1**, 63 (1981).
- [5] 西村 純, 藤井正美, 山上隆正, 上層における気球動作の温度効果について. 宇宙研報告, **9**, 1(B), (1973) 167.